

تحقیقات بتن

سال شانزدهم، شماره اول

بهار ۱۴۰۲

ص ۴۵-۵۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۸

ارزیابی مقاومت فشاری بتن با استفاده از روش‌های سرعت پالس اولتراسونیک و مقاومت الکتریکی

مصطفی فرمان

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه ملایر.

علیرضا آذریون *

استادیار، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر.

غلامرضا قهرمانی

استادیار، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر.

چکیده

مقاومت فشاری بتن از مهم‌ترین خواص آن در نظر گرفته می‌شود و معمولاً شمای کلی از کیفیت بتن را ارائه می‌دهد، زیرا به‌طور مستقیم به ریزساختار خمیر سیمان بستگی دارد. ارزیابی مقاومت فشاری بتن به روش‌های مخرب و غیرمخرب انجام می‌شود. روش‌های غیرمخرب، با تعداد آزمون‌های به‌مراتب کمتر می‌توانند تخمین مناسبی از مقاومت فشاری بتن به‌دست دهند. در این تحقیق از روش‌های غیرمخرب اولتراسونیک و مقاومت الکتریکی برای تخمین مقاومت فشاری آزمون‌های بتن معمولی با سه نسبت متفاوت آب به سیمان استفاده شد و مدل‌های ریاضی برای تخمین مقاومت فشاری توسط این روش‌ها ارائه و از لحاظ دقت با هم مقایسه شدند. از نرم‌افزار آماری SPSS برای تحلیل داده‌های آزمایش‌ها استفاده شد. مدل‌های ریاضی خطی و غیرخطی بیانگر رابطه بین پارامترهای مقاومت الکتریکی، سرعت پالس اولتراسونیک و مقاومت فشاری برای هر یک از نسبت‌های آب به سیمان به وسیله نرم‌افزار استخراج شدند. نتایج نشان داد ترکیب دو روش سرعت پالس اولتراسونیک و مقاومت الکتریکی برای تخمین مقاومت فشاری در مقایسه با تنها یک روش، از دقت بیشتری برخوردار است. براساس نتایج حاصله، شکل اصلاح شده تابع نمایی با محدوده ضریب تعیین $0/83-0/63$ و میانگین قدرمطلق خطای نسبی $6/5-2/3$ درصد و تابع چندجمله‌ای با محدوده ضریب تعیین $0/89-0/63$ و میانگین قدرمطلق خطای نسبی $7-3/2$ درصد دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: سرعت پالس اولتراسونیک، مقاومت الکتریکی، روش‌های غیرمخرب، همبستگی، مقاومت فشاری.

* نویسنده مسئول: azarioon@gmail.com

۱- مقدمه

نتایج دقیقی تری برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن دست یافت [۱۰-۱۶]. در بیشتر مطالعات، ترکیب دوروش UPV و RN (به اصطلاح SonReb) مورد استفاده قرار گرفته است، اما طبق نظر برخی دیگر، این دو روش مکمل خوبی برای یکدیگر نمی باشند [۱۱، ۱۲]. بهمنی و مدندوست به بررسی مقاومت فشاری بتن توسط شبکه های عصبی مصنوعی با در نظر گرفتن چهار پارامتر سن، نسبت آب به سیمان، RN و UPV پرداختند. نتایج آنان نشان داد مدل شبکه عصبی ایجاد شده، با جلد میانگین مربعات خطای ۲/۳۱ و ضریب تعیین ۰/۹۵ دارای دقت بیشتر و خطای تخمین کمتری در مقایسه با سایر مدل ها می باشد [۱۳].

سبارتای^۵ و همکاران به مطالعه حساسیت و عدم قطعیت اندازه گیری ها در روش های غیرمخرب نسبت به عوامل مختلف پرداختند. آنها ۹۰ دال بتنی از ۸ طرح مخلوط را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که ترکیب روش های غیرمخرب رادار نفوذی^۶، ER و UPV برای ارزیابی مقاومت فشاری و میزان آب مناسب می باشد [۱۴].

محمد و همکاران، با استفاده از مقادیر UPV و RN به این نتیجه رسیدند که مدل های دو متغیره توانی، خطی و نمایی، همگی دارای ضرایب تعیین قابل قبولی بوده و از دقت مناسبی برخوردار هستند [۱۵]. سایر محققین، روابط دو متغیره دیگری به صورت توابعی از UPV و RN با شکل خطی [۱۶، ۱۷]، نمایی [۱۸]، چندجمله ای [۱۹-۲۱]، و توانی [۲۲-۲۴، ۱۱، ۸] پیشنهاد نمودند.

در برخی مطالعات، روش های غیرمخرب دیگری مورد استفاده قرار گرفته است. کاندلاریا^۷ و همکاران، چند مدل غیرخطی برحسب متغیرهای UPV، ER، نسبت آب به سیمان و چگالی بتن ارائه نمودند که ضرایب تعیین بسیار مناسبی (بین ۰/۹ و یک) داشتند، هر چند این مدل ها به نسبت پیچیده بودند [۲۵]. در برخی تحقیقات، ترکیب UPV و روش های نیمه مخرب (مانند مقاومت نفوذی^۸) مورد توجه قرار گرفته است [۲۶-۲۹].

تحقیقات کمی درباره استفاده از روش ER به تنهایی یا ترکیب سایر روش ها برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن انجام شده است که در این پژوهش مورد توجه قرار خواهند گرفت. یکی از مزایای

بتن پرمصرف ترین ماده ساختمانی است و ارزیابی کیفیت آن در سازه های موجود و در حال ساخت اهمیت فراوانی دارد. ارزیابی بتن به وسیله روش های مخرب، نیمه مخرب یا غیرمخرب انجام می شود. در بسیاری از روش های استاندارد ارزیابی کیفیت بتن، آزمایش ها روی نمونه های برداشته شده از محل و با استفاده از روش های مخرب انجام می شوند. رسیدن به نتایج این آزمایش ها زمان بر بوده و به طور معمول به دلایل اقتصادی، تعداد نمونه ها کمتر از حد لازم است. در سالیان اخیر، استفاده از روش های غیرمخرب مانند سرعت پالس اولتراسونیک (UPV)^۱، چکش اشمیت (RN)^۲ و مقاومت الکتریکی (ER)^۳ جهت ارزیابی خواص مکانیکی بتن و دوام آن افزایش یافته است، زیرا به کمک این روش ها می توان اطلاعاتی از خواص مکانیکی بتن (مانند مقاومت فشاری، مدول یانگ و مدول گسیختگی) و شاخص های دوام آن (مانند تخلخل، درصد جذب آب و عمق کربناسیون) را بدون آسیب رساندن به بتن به دست آورد. روش های غیرمخرب از لحاظ تنوع نیز رشد قابل توجهی داشته اند، به گونه ای که در گزارش ACI به ۲۳ روش مختلف اشاره گردیده است [۱]. در دیگر گزارش ACI، هفت روش تخمین مقاومت درجای بتن مورد بررسی قرار گرفته اند [۲]. این روش ها در مقایسه با روش های مخرب از سرعت بیشتر و هزینه کمتر برخوردار بوده و در مناطقی که امکان مغزه گیری وجود ندارد قابل استفاده می باشند [۳].

در سالیان اخیر، تحقیقات فراوانی در مورد کارایی این روش ها (به خصوص دو روش UPV و RN) انجام شده است. هادیان فرد و جعفری، از روش UPV برای ارزیابی مقاومت فشاری سه طرح مخلوط بتن سبک استفاده کردند نتایج آن ها بیانگر دقت مناسب مدل های نمایی برای بیان رابطه بین مقاومت فشاری و UPV بود [۴].

وی^۴ و همکاران با مطالعه روی هشت نوع سیمان، یک رابطه خطی بین مقاومت فشاری خمیر سیمان و مقاومت الکتریکی ارائه دادند [۵].

تحقیقات زیادی نشان داد که با ترکیب دو یا چند روش می توان به

⁵ Sbartai

⁶ Ground Penetration Radar (GPR)

⁷ Candelaria

⁸ Penetration Resistance

¹ Ultrasonic Pulse Velocity

² Rebound number

³ Electrical Resistivity

⁴ Wei

در جدول های ۲ و ۳ آمده است.

جدول ۲- مشخصات شیمیایی سیمان

درصد	ترکیب	درصد	ترکیب
≤ 0.58	K ₂ O	≥ 21	SiO ₂
≤ 0.22	Na ₂ O	4.65 ± 0.5	Al ₂ O ₃
≥ 53	C ₃ S	3.9 ± 0.4	Fe ₂ O ₃
20 ± 2	C ₂ S	≥ 63.5	CaO
$5/5 \pm 1/5$	C ₃ A	≤ 3	MgO
12 ± 2	C ₄ AF	≤ 3	SO ₃

جدول ۳- مشخصات فیزیکی سیمان

مقدار	ویژگی
۳/۱۱	چگالی (gr/cm ³)
3300 ± 150	سطح مخصوص (cm ² /gr)
140 ± 30	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
190 ± 35	زمان گیرش نهایی (دقیقه)
$63 \leq$	مقاومت خمشی ۲۸ روزه (kg/cm ²)
$460 \leq$	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm ²)

۲-۳- آب

در این پژوهش از آب آشامیدنی شبکه آب رسانی شهرستان ملایر استفاده شده است. مشخصات شیمیایی آب در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- مشخصات شیمیایی آب شرب

مقدار میانگین	پارامتر
۶/۷۹	pH
۰/۶۹	(dS/m) EC ^۱
۰/۴۱	K(mg/l)
۱/۳۷	(mg/l) Na
۲۷/۶۱	(mg/l) NO ₃

۲-۴- فوق روان کننده

جهت حصول کارایی مطلوب و روانی مخلوط از فوق روان کننده فرکوپلاست P10N بر پایه پلی کربوکسیلات استفاده شد. مشخصات فیزیکی آن در جدول ۵ آمده است

مهم ترکیب دو روش UPV و ER، تأثیر متفاوت درجه اشباع بتن بر این دو پارامتر است: افزایش درجه اشباع سبب افزایش UPV می گردد، اما ER را کاهش می دهد [۳۱]. مکمل بودن دو روش غیرمخرب از لحاظ حساسیت به پارامترهایی چون میزان رطوبت و تخلخل می تواند سبب بهبود ترکیب آنان شود [۱۱، ۳۱]. در تحقیق حاضر، از دو روش غیرمخرب UPV و ER و ترکیب آنها برای تخمین مقاومت فشاری آزمونه های بتنی استفاده خواهد شد.

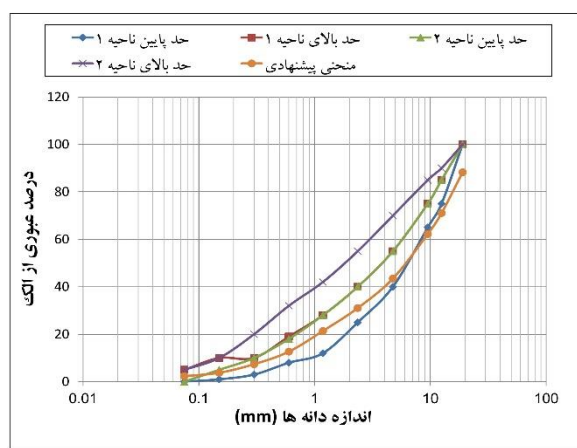
۲- مواد و روش ها

۲-۱- سنگ دانه ها

مشخصات مصالح سنگی مصرفی در ساخت نمونه ها (با حداکثر اندازه ۲۵ میلی متر) مطابق جدول ۱ می باشد. در مخلوط سنگ دانه، ۴۳ درصد ماسه، ۲۷ درصد شن درشت و ۳۰ درصد شن ریز لحاظ شده است. منحنی دانه بندی مخلوط در شکل ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مصالح سنگی

شن درشت	شن ریز	ماسه	نوع سنگ دانه
۲/۷۱	۲/۷	۲/۷۱	وزن مخصوص (gr/cm ³)
۰/۸۹	۰/۹۴	۰/۷۵	جذب آب (%)
--	--	۴/۲	مدول نرمی



شکل ۱- منحنی دانه بندی مصالح سنگی

۲-۲- سیمان

سیمان به کاررفته در این پژوهش، سیمان پرتلند نوع یک تهیه شده از کارخانه لامرد فارس می باشد. مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن

^۱ Electrical Conductivity

۱-۵-۲- اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی ویژه بتن، یک مشخصه مهم و مرتبط با پارامترهای ساختار فیزیکی (مانند نفوذپذیری و ریزساختار) و ساختار شیمیایی بتن (غلظت و میزان تحرک یون‌های مختلف) می‌باشد [۳۰]. کاربرد اصلی روش غیرمخرب مقاومت الکتریکی در ارزیابی دوام بتن است، اما در برخی تحقیقات برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن نیز پیشنهاد شده است [۳۱].

مقاومت الکتریکی بتن را می‌توان با استفاده از روش‌های یک، دو یا چهار الکترودی محاسبه نمود [۳۰]. دستگاه مقاومت الکتریکی مورد استفاده در این تحقیق، دارای دو الکترود به شکل صفحه‌های مسی است که به صفحه‌های پلاستیکی چسبانیده شده اند. برای اتصال الکترودها با سطح بتن از خمیر سیمان با نسبت ثابت آب به سیمان استفاده شد. ابتدا بر روی یکی از صفحه‌های مسی مقداری خمیر سیمان قرار داده شده و توسط کاردک پخش می‌شود. سپس نمونه که در شرایط رطوبتی اشباع با سطح خشک است، بر روی آن قرار داده می‌شود. سپس سطح فوقانی نمونه نیز با خمیر سیمان پوشانده و صفحه مسی فوقانی همراه یک وزنه برای اطمینان از اتصال کامل بر روی نمونه قرار داده می‌شود. کابل‌های دستگاه به صفحه‌های مسی متصل شده و مقاومت الکتریکی یادداشت می‌شود. مقاومت الکتریکی ویژه ظاهری از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد [۳].

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (1)$$

مقاومت ویژه الکتریکی (اهم-متر)، R مقاومت الکتریکی (اهم)، A سطح مقطع صفحه‌های بالا و پایین (m^2) و L طول (ارتفاع) نمونه (m) است.

۲-۵-۲- اندازه‌گیری سرعت پالس اولتراسونیک

این آزمایش طبق دستورالعمل ASTM C597 [۳۲] انجام گرفت. دستگاه شامل یک وسیله ایجاد موج، انتقال دهنده به بتن و گیرنده بوده که زمان انتقال موج در بتن را بدست می‌دهد. از عواملی که بر UPV مؤثر هستند می‌توان به نسبت‌های طرح مخلوط، سن، شرایط عمل‌آوری و شرایط محیطی اشاره نمود [۳۳، ۱۰]. برای انجام آزمایش، ابتدا نمونه که مورد آزمایش مقاومت الکتریکی قرار گرفته با پارچه مرطوب از ملات سیمان پاک شده و بر روی میز

جدول ۵- مشخصات فیزیکی فوق روان کننده

شکل ظاهری	مایع سبز تیره
ورن مخصوص (gr/cm^3)	۱/۱
طبیعت یونی	آنیونی
میزان کلر (PPM)	کمتر از ۵۰۰

۲-۵-۲- برنامه آزمایشگاهی

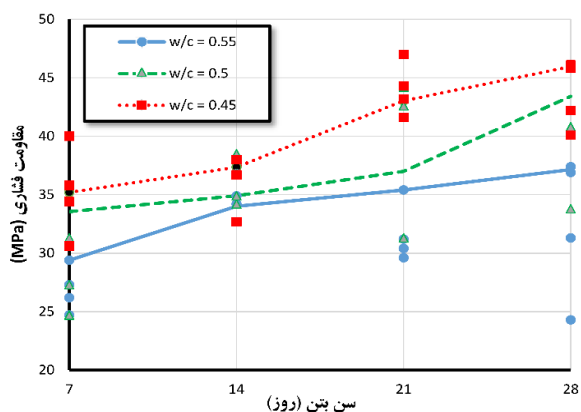
در این پژوهش، سه طرح مخلوط مطابق جدول شماره ۶ با عیار سیمان ۴۷۵ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت‌های آب به سیمان متفاوت (۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵) ساخته شدند. از هر طرح مخلوط ۱۶ آزمون مکعبی به ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر تهیه شدند.

جدول ۶- طرح‌های مخلوط مورد استفاده (kg/m^3)

طرح مخلوط	سیمان	آب	ماسه	شن ریز	شن درشت
M45	۴۷۵	۲۱۴	۷۱۷	۵۰۰	۴۵۰
M50	۴۷۵	۲۳۸	۶۹۰	۴۸۱	۴۳۳
M55	۴۷۵	۲۶۱	۶۶۲	۴۶۲	۴۱۶

محاسبه وزن اجزا طبق روش ملی طرح مخلوط بتن انجام شده و میزان آب با توجه به درصد رطوبت آبی مصالح اصلاح گردید. پس از مرطوب کردن سطح داخلی مخلوط‌کن، ابتدا نیمی از سنگ‌دانه به همراه تمام سیمان داخل مخلوط‌کن ریخته و اجازه داده شد تا به مدت حدود ۲ دقیقه کاملاً مخلوط شود. سپس حدود ۷۰ درصد آب و بقیه سنگ‌دانه و روان‌ساز اضافه شد و به مدت حدود ۲ تا ۳ دقیقه مخلوط گردید. مخلوط به دست آمده در قالب‌های فلزی ریخته شد. پس از تراکم، قالب‌ها برای جلوگیری از تبخیر آب با صفحه پلاستیکی پوشانده شدند. آزمون‌های بتنی پس از ۲۴ ساعت در حوضچه آب قرار داده شدند.

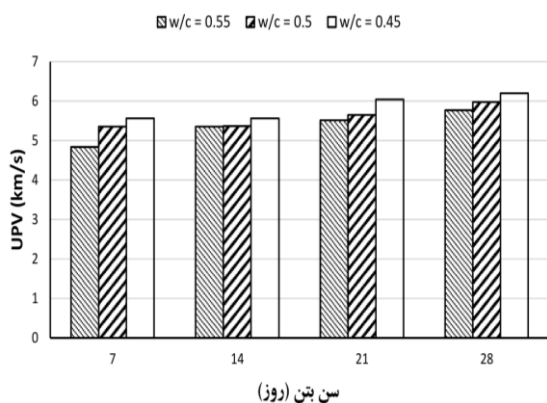
آزمایش‌های مورد نظر در سنین ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روزه انجام شدند. برای هر یک از طرح‌ها چهار آزمون مکعبی از حوضچه برداشته و سطح آنها را با پارچه خشک شدند. سپس هر آزمون با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و سپس دستگاه سنجش سرعت پالس اولتراسونیک مورد آزمایش قرار گرفت و در نهایت با استفاده از دستگاه جک فشاری تا رسیدن به مقاومت نهایی بارگذاری گردید.



شکل ۳- تغییرات مقاومت فشاری در طرح‌های مخلوط

۳-۲- نتایج آزمایش اولتراسونیک

تغییرات UPV میانگین در سنین مختلف در شکل ۴ دیده می‌شود. سرعت امواج اولتراسونیک با افزایش سن رابطه مستقیم و با افزایش نسبت آب به سیمان رابطه معکوس دارد. این نتایج با توجه به کاهش تخلخل در نمونه‌های بتنی و به تبع آن کاهش طول مسیر پیموده شده توسط امواج، مورد انتظار می‌باشند. از سوی دیگر، طرح‌های مخلوط با نسبت آب به سیمان کمتر دارای میزان سنگ‌دانه بیشتری می‌باشند که به نوبه خود سبب افزایش UPV می‌گردد [۳۳].



شکل ۴- تغییرات UPV با سن و نسبت آب به سیمان

۳-۳- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

با توجه به شکل ۵، ملاحظه می‌گردد با کاهش نسبت آب به سیمان، مقاومت الکتریکی بتن افزایش پیدا می‌کند. این امر به دلیل کاهش تخلخل و میزان حفرات موجود در بتن می‌باشد. عامل دیگری که به صورت قابل ملاحظه‌ای بر روی مقاومت الکتریکی اثر

دستگاه سنجش سرعت پالس اولتراسونیک قرار داده شده و بعد آن در امتداد مورد آزمایش توسط کولیس اندازه‌گیری می‌شود. سپس مقدار کمی ژل واسط^۱ برای پر کردن فضاهای خالی بین سطوح آزمون و سطوح پالس‌ها بر روی آنها زده می‌شود. باید توجه داشت لرزش پالس‌های دستگاه روی سطوح آزمون موجب ثابت نماندن عدد نشان‌دهنده زمان عبور امواج و ایجاد خطا در اندازه‌گیری می‌گردد. سپس موج اولتراسونیک ارسال شده و زمان عبور بر حسب میکروثانیه یادداشت می‌گردد. سرعت ظاهری پالس اولتراسونیک (Cp) از رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۳۲].

$$Cp = \frac{L}{T} \quad (2)$$

L فاصله پیموده شده موج و T زمان انتقال موج می‌باشد. شکل ۲ دستگاه‌های آزمایش غیرمخرب مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۲- الف) دستگاه اندازه‌گیری سرعت امواج اولتراسونیک، ب) مقاومت الکتریکی

۳- بحث و بررسی

۳-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

برای طرح‌های مخلوط ارائه شده در جدول ۶، آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روزه انجام و نتایج آزمایش هر یک از آزمون‌ها به همراه مقادیر متوسط در شکل ۳ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود میزان رشد مقاومت فشاری از سن ۷ تا ۲۸ روزه در سه طرح M45، M50، M55 به ترتیب برابر ۲۶، ۲۹ و ۳۰ درصد است.

¹ Couplant

تمام سنین و نسبت‌های آب به سیمان) مرتبط با پارامتر ER یا UPV در محدوده نسبتاً مناسبی (حدود ۰/۶) قرار دارد، اما مقادیر MAPE در محدوده ۸/۷-۱۱ درصد واقع شده‌اند که نشان‌دهنده دقت تخمین نامناسبی می‌باشد.

در صورت تفکیک داده‌ها بر اساس نسبت آب به سیمان در طرح مخلوط M45 اعداد ضریب تعیین (در حالت تک متغیره بر حسب UPV) در محدوده ۰/۷ و مقادیر MAPE در محدوده نزدیک به ۵ درصد قرار می‌گیرند که بیانگر دقت مناسب در تخمین مقاومت فشاری با استفاده از مقادیر UPV می‌باشد.

۳-۵- تخمین مقاومت فشاری با ترکیب روش‌های مقاومت الکتریکی و سرعت پالس اولتراسونیک

مرحله نهایی تحلیل داده‌ها، بررسی توانایی ترکیب دو روش UPV و ER به منظور تخمین مقاومت فشاری بتن می‌باشد. پس از تحلیل داده‌های آزمایش‌ها، مدل‌های ریاضی خطی و غیرخطی دو متغیره برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن ارائه می‌شوند. در مرحله انتخاب توابع دو متغیره باید توجه داشت بسیاری از آنها به وسیله یک تبدیل ریاضی قابل نوشتن به شکل خطی هستند. در این صورت، نیازی به وارد کردن مقادیر اولیه برای پارامترهای مدل همبستگی^۳ وجود ندارد. اما در مدل‌هایی که ذاتاً غیرخطی هستند، علاوه بر نیاز به حدس اولیه برای پارامترها، امکان حاصل نشدن بهینه کلی و به دام افتادن نرم‌افزار در یک نقطه بهینه محلی وجود دارد. در ادامه، سه گروه مهم از این مدل‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند.

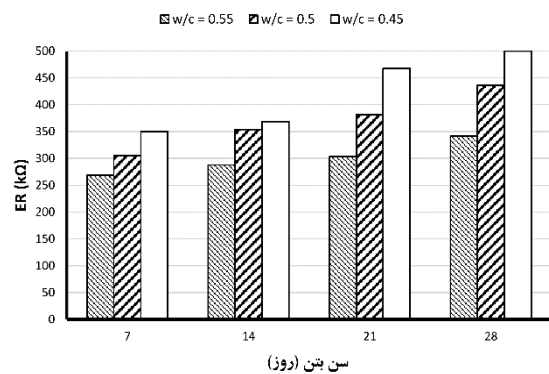
۳-۵-۱- مدل دو متغیره توانی

این مدل در تحقیقات قبلی با استفاده از ترکیب دو روش UPV و RN به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [۲۴-۲۲، ۱۱، ۸]. بنابراین منطقی است کارایی آن در ترکیب UPV و ER نیز بررسی شود. شکل کلی به صورت رابطه ۴ می‌باشد.

$$f_c = a \cdot (UPV)^b \cdot (ER)^c \quad (4)$$

a و b پارامترهای رابطه هستند. با لگاریتم‌گیری از طرفین رابطه می‌توان آنرا به شکل خطی تبدیل نمود. ضرایب تعیین و پارامترها در ردیف

می‌گذارد، مقدار آب آزاد بتن می‌باشد [۱۴]. در طرح مخلوط‌های مورد استفاده به علت ثابت بودن مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان بیشتر متناظر با مقدار آب آزاد بیشتر است. که خود منجر به کاهش مقاومت الکتریکی می‌گردد. ضمناً با افزایش سن، مقاومت الکتریکی بتن افزایش پیدا می‌کند. با توجه به اندک بودن مقاومت الکتریکی خمیرسیمان در مقابل سنگ‌دانه، کاهش در حجم خمیر سیمان باعث افزایش مقاومت ویژه الکتریکی خواهد شد. بنابراین، طرح مخلوط M45 که دارای کمترین میزان حجم خمیر سیمان است دارای بیشترین مقاومت الکتریکی خواهد بود.



شکل ۵- تغییرات ER با سن و نسبت آب به سیمان

۳-۴- تخمین مقاومت فشاری با استفاده از یک روش غیرمخرب

در این بخش با استفاده از تحلیل داده‌های آزمایش‌ها به وسیله نرم افزار آماری SPSS v26، به ارائه مدل‌های ریاضی یک متغیره پرداخته می‌شود. در این مدل‌ها، تخمین مقاومت فشاری بتن توسط پارامتر ER یا UPV انجام می‌گیرد. به منظور مقایسه کارایی مدل‌ها، از دو معیار ضریب تعیین^۱ و میانگین قدرمطلق خطای نسبی (MAPE^۲) استفاده گردید. کمیت اخیر از رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۳۴].

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{f_{model} - f_c}{f_c} \right| \times 100 \quad (3)$$

برابر مقدار مقاومت فشاری پیش‌بینی شده، f_c مقدار اندازه‌گیری شده و n تعداد است. نتایج محاسبات برای ۱۰ تابع انتخابی در جدول ۷ آورده شده‌اند.

همانطور که ملاحظه می‌گردد ضریب تعیین تعیین داده‌های کل (شامل

³ Regression

¹ R-squared

² Mean Absolute Percentage Error

اول جدول ۸ آورده شده‌اند. ملاحظه می‌گردد بجز طرح مخلوط M45، مدل مذکور در ارزیابی مقاومت فشاری ناکارآمد می‌باشد.

جدول ۷- ضرایب تعیین (میانگین قدرمطلق خطای نسبی) در تخمین مقاومت فشاری با استفاده از توابع تک متغیره انتخابی

ضریب تعیین (R^2) رابطه f_c و ER			ضریب تعیین (R^2) رابطه f_c و UPV				رابطه تک متغیره (**=توان)	
داده های تفکیک شده			داده های تفکیک شده					
M45	M50	M55	M45	M50	M55			
.58	.52	.48	.71	.37	.38	.6	b1+b2*x	خطی
.59	.52	.49	.71	.37	.37	.58	b1+b2.Ln x	لگاریتمی
.58	.51	.49	.70	.37	.36	.55	b1+b2/x	معکوس
.59	.52	.48	.72	.38	.40	.63	b1+b2*x+b3*x**2	درجه دوم
.59	.52	.48	.72	.38	.40	.63	b1+b2*x+b3*x**2 +b4*x**3	درجه سوم
.57	.50	.46	.68	.34	.39	.58	b1*(b2**x)	نمایی ^۱
.58	.51	.47	.68	.35	.38	.57	b1*(x**b2)	توانی
.56	.51	.48	.67	.35	.37	.55	exp(b1+b2/x)	کس نمایی
.58	.50	.46	.68	.35	.39	.58	b1*exp(b2*x)	نمایی
.51	.32	.16	.45	.10	.07	.30	(b1+b2*x)/(b3+b4*x)	هموگرافیک

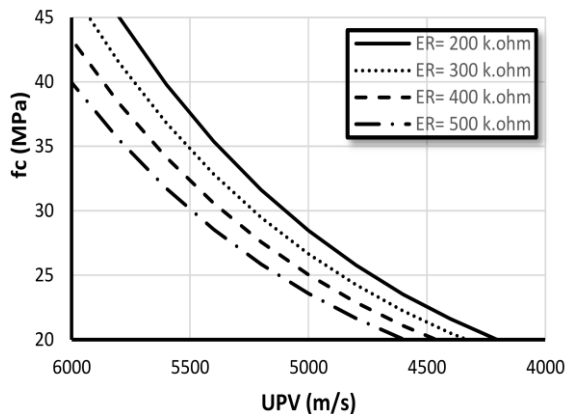
جدول ۸- ضرایب تعیین (میانگین قدرمطلق خطای نسبی) در تخمین مقاومت فشاری با استفاده از توابع دو متغیره انتخابی

ضریب تعیین (R^2)				معادله*	نوع رابطه دو متغیره
M45	M50	M55	داده های تفکیک شده		
.68	.51	.50	.65	$f_{c1} = (1.057 \times 10^{-10}). (UPV)^{3.313}. (ER)^{-0.352}$	۱ توانی
.68	.50	.50	.64	$f_{c2} = 2.303 (1.00054)^{UPV}. (0.9993)^{ER}$	۲ نمایی
.83	.65	.63	.73	$f_{c3} = (2.284 \times 10^{-3}). (1.001607)^{UPV}. (0.9979)^{ER} + 26.9$	۳ نمایی
.72	.52	.51	.67	$f_{c4} = 0.02317 UPV - 0.03562 ER - 82.158$	۴ خطی
.89	.65	.63	.68	$f_{c5} = (-1.06 \times 10^{-3}). (ER)^2 + 1.93 \times 10^{-4} ER. UPV + 2500799/UPV + 39992/ER - 770.97$	۵ چندجمله‌ای

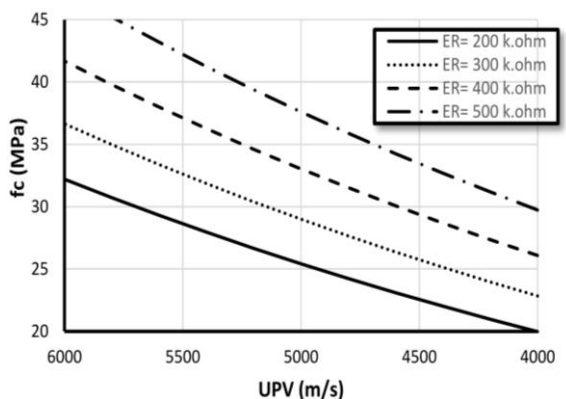
^۱ Compound

MAPE در محدوده ۱۶/۲-۸ درصد واقع شده‌اند که نشان‌دهنده دقت تخمین نامناسبی می‌باشد. در سایر حالات، ضرایب تعیین در محدوده ۰/۶ و مقادیر MAPE حداکثر ۶ درصد است.

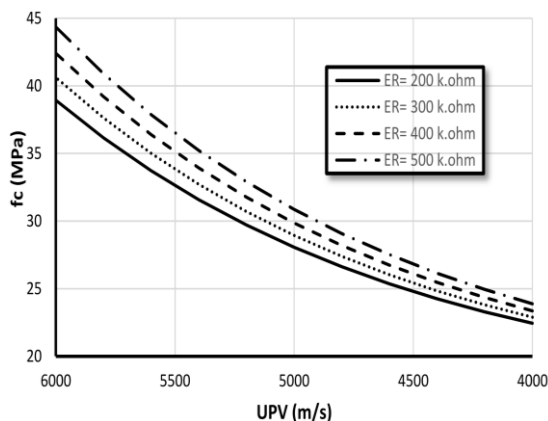
با توجه به دومتغیره بودن روابط، برای نمایش آن از دسته منحنی‌ها استفاده گردید. برای مقادیر ER از ۲۰۰ تا ۵۰۰ کیلو اهم، منحنی‌های حاصل برای سه طرح مخلوط در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده‌اند.



شکل ۶ - تخمین مقاومت فشاری طرح M45 (مدل شماره ۳)



شکل ۷ - تخمین مقاومت فشاری طرح M50 (مدل شماره ۳)



شکل ۸ - تخمین مقاومت فشاری طرح M55 (مدل شماره ۳)

۳-۵-۲- مدل‌های چندجمله‌ای و کسری

به منظور بررسی این دسته از توابع، کلیه حالاتی که به صورت ترکیب خطی دو تا چهار جمله‌ای از متغیرهای UPV، ER، توان‌های دوم تا چهارم، حاصل ضرب و معکوس آنها و نیز نسبت‌های UPV/ER و ER/UPV بودند در نظر گرفته شدند. ۷۸ حالت ترکیب دوجمله‌ای، ۲۸۶ حالت سه‌جمله‌ای و ۷۱۵ حالت چهارجمله‌ای در نرم‌افزار SPSS تحلیل گردیدند. از بین آنها، مدل شماره ۵ دارای بیشترین ضریب تعیین و کمترین میانگین قدرمطلق خطای نسبی است. شکل کلی این مدل به صورت رابطه ۵ است.

$$f_c = a(ER)^2 + b.ER.UPV + \frac{c}{UPV} + \frac{d}{ER} + e \quad (5)$$

a، b، c، d و e پارامترهای مدل می‌باشند که مقادیر آنها برای داده‌های کل در ردیف آخر جدول ۸ داده شده‌اند.

۳-۵-۳- مدل دو متغیره نمایی

شکل کلی این مدل به صورت رابطه ۶ می‌باشد.

$$f_c = a. (b)^{UPV}. (c)^{ER} \quad (6)$$

a، b و c پارامترهای رابطه می‌باشند. این رابطه نیز به کمک لگاریتم‌گیری قابل تبدیل به شکل خطی است. ضرایب تعیین و پارامترهای به دست آمده مدل توانی در ردیف دوم جدول ۸ نشان داده شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود، مدل نمایی از لحاظ ضریب تعیین تفاوت قابل ملاحظه‌ای با مدل توانی ندارد. در تحقیق حاضر، شکل اصلاح شده این رابطه با اضافه کردن یک مقدار ثابت نیز مورد بررسی قرار گرفت که به شکل کلی رابطه ۷ می‌باشد.

$$f_c = a. (b)^{UPV}. (c)^{ER} + d \quad (7)$$

a، b، c و d پارامترهای رابطه می‌باشند. لازم به ذکر است که مدل اخیر قابل نوشتن به شکل خطی نبوده و باید با استفاده از بخش همبستگی غیرخطی نرم‌افزار مورد ارزیابی قرار گیرد. ضرایب تعیین و پارامترهای به دست آمده از مدل توانی اصلاح شده در ردیف سوم جدول ۸ نشان داده شده‌اند.

ملاحظه می‌گردد بجز در حالت استفاده از داده‌های کل، در سایر حالات دقت تخمین قابل قبول می‌باشد ضریب تعیین داده‌های کل (شامل تمام سنین و نسبت‌های آب به سیمان) در مدل‌های دو متغیره در محدوده نسبتاً مناسبی (حدود ۰/۷) قرار دارد، اما مقادیر

آب به سیمان (۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵) در محدوده مقاومت الکتریکی بین ۲۷۰-۵۰۰ k.ohm و سرعت پالس اولتراسونیک بین ۶۳۰۰-۴۳۰۰ به دست آمده و دارای دقت قابل قبولی می‌باشند.

۵- مراجع

- [1] American Concrete Institute. (2013). Report on nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures. ACI 228.2R-13.
- [2] American Concrete Institute. (2019). Report on Methods for Estimating In-Place Concrete Strength. ACI 228.1R-19.
- [3] Malhotra, V. M., & Carino, N. J. (2003). Handbook on nondestructive testing of concrete. CRC press.
- [4] Hadianfard, M. A., & Jafari, S. (2016). Prediction of lightweight aggregate concrete compressive strength using ultrasonic pulse velocity test through gene expression programming. Scientia Iranica. Transaction C, 23(6), 2506.
- [5] Wei, X., Xiao, L., & Li, Z. (2012). Prediction of standard compressive strength of cement by the electrical resistivity measurement. Construction and Building Materials, 31, 341-346.
- [6] Breyse, D., Balayssac, J. P., Biondi, S., Corbett, D., Goncalves, A., Grantham, M. & Sbartai, Z. M. (2019). Recommendation of RILEM TC249-ISC on nondestructive in situ strength assessment of concrete. Materials and Structures, 52(4), 1-21.
- [7] Breyse, P. D. P. J. B., & Balayssac, J. P. (2021). Non-destructive in situ strength assessment of concrete. Springer International Publishing.
- [8] Breyse, D. (2012). Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. Construction and Building Materials, 33, 139-163.
- [9] Mahmoudabadi, E. (2014). Nondestructive evaluation of plain and polymer concrete. Ph.D. thesis, The University of Arizona.
- [10] Qasrawi, H. Y. (2000). Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. Cement and concrete research, 30(5), 739-746.
- [11] Balayssac, J. P., & Garnier, V. (Eds.). (2017). Non-destructive testing and evaluation of civil engineering structures. Elsevier.
- [12] Carvalho, C. H. D., Severo Junior, J. B., Macedo, M. C. S. S., Griza, S., de Andrade, C. E. C., Dos Santos, A. A., & Barreto, L. S. (2014). Application of statistical techniques to evaluate the reliability of ultrasonic and rebound hammer measurements of compressive strength in the

همانطور که ملاحظه می‌شود، در دسته منحنی‌های حاصله UPV و مقاومت فشاری دارای رابطه مستقیم می‌باشند.

۴- نتیجه گیری

- ترکیب روش‌های غیرمخرب ER و UPV می‌تواند به عنوان یک روش قابل قبول برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن به کار رود. برای دقت تخمین بهتر، تفکیک داده‌ها بر اساس نسبت آب به سیمان مناسب می‌باشد.
- به منظور ارزیابی دقت مدل‌ها لازم است علاوه بر ضریب تعیین، از معیار دیگری مانند میانگین قدرمطلق خطای نسبی استفاده نمود.
- تخمین مقاومت فشاری با در نظر گرفتن داده‌های کل (شامل تمام سنین و نسبت‌های آب به سیمان) با استفاده از روش‌های غیرمخرب ER و UPV به تنهایی، دارای خطای قابل ملاحظه‌ای می‌باشد. استفاده از ترکیب دو روش غیرمخرب نیز تاثیری در کاهش خطا ندارد. بنابراین استفاده هم‌زمان از داده‌های تمام سنین و نسبت‌های آب به سیمان قابل توصیه نمی‌باشد.
- در صورت تفکیک داده‌ها بر اساس نسبت آب به سیمان، ترکیب دو روش غیرمخرب موجب افزایش دقت تخمین مقاومت فشاری می‌گردد. با توجه به قرار گرفتن خطا در محدوده قابل قبول، لزومی به تفکیک بر اساس سن بتن که سبب کاهش تعداد داده‌ها می‌شود، وجود ندارد. در طرح مخلوط‌های M50 و M55، انتخاب تابع دو متغیره دارای تاثیر قابل ملاحظه‌ای بوده و استفاده از مدل ترکیبی چند جمله‌ای و نمایی (شکل اصلاح شده مطابق رابطه ۷) دارای دقت مناسبی می‌باشد. در طرح مخلوط M45، استفاده از تابع تک متغیره بر حسب UPV به نتایج قابل قبولی منجر می‌شود، هر چند در این طرح مخلوط نیز استفاده از توابع چندجمله‌ای و نمایی اصلاح شده به دقت بیشتری منجر خواهد شد. این پدیده را می‌توان به این صورت توجیه نمود که از بین سه طرح مخلوط، M45 دارای کمترین میزان حجم خمیر سیمان است. با توجه به تغییرات بسیار کمتر UPV در سنگ‌دانه نسبت به خمیر سیمان، در طرح مخلوط مذکور نرخ تغییرات UPV در سنین مختلف کمتر بوده و اختلاف نتایج حاصل از مدل‌های مختلف با یکدیگر نیز کمتر خواهد بود. ۵- در هیچ یک از حالات فوق، تخمین مقاومت فشاری با استفاده از تابع تک متغیره بر حسب ER توصیه نمی‌گردد.
- روابط دو متغیره ارائه شده چند جمله‌ای و نمایی برای سه نسبت

- Passerino, C. R. (2004). Combined non-destructive methods applied to normal-weight and lightweight-concrete. *Insight-Wigston Then Northampton*, 46(12), 748-753.
- [25] Candelaria, M. D. E., Kee, S. H., & Lee, K. S. (2022). Prediction of Compressive Strength of Partially Saturated Concrete Using Machine Learning Methods. *Materials*, 15(5), 1662.
- [26] Yoo, J. K., & Ryu, D. W. (2008). A study of the evaluation of strength development property of concrete at early ages. In 3rd acf international conference-acf/vca.
- [27] Pucinotti, R. (2007). The use of multiple combined non-destructive testing in the concrete strength assessment. *HSNDT International 2007 on ndt. net*, 1-7.
- [28] Breysse, D., Soutsos, M., Moczko, A., & Laurens, S. (2010). Quantitative non-destructive assessment of in situ concrete properties: the key question of calibration. *Structural faults and repair*, Edinburgh, 1517.
- [29] Muuml; rsel, E. (2009). Prediction of the compressive strength of vacuum processed concretes using artificial neural network and regression techniques. *Scientific Research and Essays*, 4(10), 1057-1065.
- [۳۰] خانزادی، مصطفی: تدین، محسن: ملکی، محمد سعید: ذهبی، سجاد و تدین، محمدحسین (۱۳۹۶). اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی بتن با روش های حجمی، سطحی، گالواپالس و هدایت الکتریکی. *مجله تحقیقات بتن*، سال دهم، شماره سوم، ص ۱۹-۲۸.
- [31] Breysse, D. (Ed.). (2012). *Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 207- INR*.
- [32] ASTM C597-16. (2016). *Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete*. West Conshohocken: ASTM.
- [33] Gebretsadik, B. T. (2013). *Ultrasonic pulse velocity investigation of steel fiber reinforced self-compacted concrete*. M.Sc. thesis, University of Nevada
- [34] Huang, Q., Gardoni, P., & Hurlebaus, S. (2011). Predicting Concrete Compressive Strength Using Ultrasonic Pulse Velocity and Rebound Number. *ACI Materials Journal*, 108(4).
- concrete of bridges. *Scientific Research and Essays*, 9(6), 136-144.
- [۱۳] بهمنی، پویا و مدندوست، رحمت (۱۳۹۴). تخمین مقاومت بتن به روش های ترکیبی اولتراسونیک و چکش اشمیت به کمک روش های غیر خطی رگرسیون و شبکه عصبی. پایان نامه کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی پویندگان دانش.
- [14] Sbartaï, Z. M., Laurens, S., Elachachi, S. M., & Payan, C. (2012). Concrete properties evaluation by statistical fusion of NDT techniques. *Construction & Building Materials*, 37, 943-950.
- [15] Mohammed, B. S., & Adamu, M. (2019). Non-destructive evaluation of nano silica-modified roller-compacted rubbercrete using combined SonReb and response surface methodology. *Road Materials and Pavement Design*, 20(4), 815-835.
- [16] Tanigawa, Y., Baba, K., & Mori, H. (1984). Estimation of concrete strength by combined nondestructive testing method. *Special Publication*, 82, 57-76.
- [17] Soshiroda, T., Voraputhaporn, K., & Nozaki, Y. (2006). Early-stage inspection of concrete quality in structures by combined nondestructive method. *Materials and Structures*, 39(2), 149-160.
- [18] Machado, M. D., Shehata, L. C. D., & Shehata, I. A. E. M. (2009). Correlation curves to characterize concretes used in Rio de Janeiro by means of non-destructive tests. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, 2, 100-123.
- [19] Shariati, M., Ramli-Sulong, N. H., Arabnejad, M. M., Shafigh, P., & Sinaei, H. (2011). Assessing the strength of reinforced concrete structures through Ultrasonic Pulse Velocity and Schmidt Rebound Hammer tests. *Scientific research and essays*, 6(1), 213-220.
- [20] Amini, K., Jalalpour, M., & Delatte, N. (2016). Advancing concrete strength prediction using non-destructive testing: Development and verification of a generalizable model. *Construction & Building Materials*, 102, 762-768.
- [21] Hobbs, B., & Kebir, M. T. (2007). Non-destructive testing techniques for the forensic engineering investigation of reinforced concrete buildings. *Forensic science international*, 167(2-3), 167-172.
- [22] Fiore, A., Porco, F., Uva, G., & Mezzina, M. (2013). On the dispersion of data collected by in situ diagnostic of the existing concrete. *Construction & Building Materials*, 47, 208-217.
- [23] Nobile, L. (2015). Prediction of concrete compressive strength by combined non-destructive methods. *Meccanica*, 50(2), 411-417.
- [24] Miretti, R., Carrasco, M. F., Grether, R. O., &

Evaluation of compressive strength of concrete using ultrasonic pulse velocity and electrical resistivity methods

Mostafa Ghareman

M.Sc. student, Department of Civil and Architectural Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

Alireza Azarioon *

Assistant Professor, Department of Civil and Architectural Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

Gholamreza Ghahremani

Assistant Professor, Department of Civil and Architectural Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

Abstract

Compressive strength of concrete is considered as one of its most important properties and usually gives an overview of the quality of concrete, because the strength depends directly on the microstructure of the cement paste. Evaluation of compressive strength of concrete is done by destructive and non-destructive methods. Non-destructive methods, with a much fewer number of tests, can provide a good estimate of the compressive strength of concrete. In this research, non-destructive ultrasonic pulse velocity and electrical resistivity methods were used to estimate the compressive strength of normal concrete tests with three different water-to-cement ratios, and mathematical models were proposed to estimate the compressive strength were compared. SPSS statistical software was used to analyze the test data. Different linear and nonlinear mathematical models related the relationship between the parameters of electrical resistivity, ultrasonic pulse velocity and compressive strength for each of the water-to-cement ratios as well as 28-day age were extracted by software to estimate the compressive strength. The results showed that the combination of ultrasonic pulse velocity and electrical resistivity methods for estimating compressive strength has a higher accuracy compared to one method alone. For this purpose, the modified form of the exponential function with a coefficient range of 0.63-0.83 and the mean absolute value of relative error 2.3-6.5% and the polynomial function with the range 0.63-0.89 and the mean absolute value of relative error is 3.2-7% had better performance.

Keywords: ultrasonic pulse velocity, electrical resistivity, non-destructive methods, regression, compressive strength.

* Corresponding Author: azarioon@gmail.com

